

炭素繊維プレートによる補強実大山形鋼ブレースの座屈試験

玉井 宏章*・高松 隆夫*・服部 明生**・小澤 吉幸**

(平成19年10月31日受理)

Buckling Test on Full-Scale Angle Steel Brace with Bonding CFRP Plates

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Akeo HATTORI, Yoshiyuki OZAWA

(Received Oct. 31, 2007)

Abstract

To enhance the usage life of existing building, a tensile force strengthening method with bonding carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plate has been developed by the authors.

To enhance the strength and deformation of steel structure member, a rehabilitation technique of compressive force strengthening as well as tensile force strengthening is required.

This paper reports the result of the loading tests on a full scaled angle steel brace before and after rehabilitation using bonding CFRP plates.

These results show enhanced compressive force carrying capacity and deformation capacity of brace by bonding CFRP plates and a proposed rehabilitation is practical and effective for a bracing steel structure.

Key Words: carbon fiber reinforced plastic plates, rehabilitation angle steel brace, buckling, combined non-linear finite element analysis

1. はじめに

炭素繊維を鋼構造物に接着して補強する工法が著者らを含めた研究者により開発・実用化されつつある^{1)~5)}。これまでに、部材としては、鋼小ばりの曲げ補剛³⁾の他に、山形鋼ブレース材の圧縮補強^{4),5)}について研究を行っている。

特に、文献4では、炭素繊維プレートによる鋼構造部材の圧縮補強への可能性を検討するため、山形鋼ブレース材に炭素繊維プレートを様々な形式で接着した模型試験体を製作し、単調圧縮載荷試験を行って、その最大耐力、軸剛性及び塑性変形性能に対する補強効果について検討した。また併せて、適正な炭素繊維プレートの接着形式を調査した。その結果、炭素繊維プレートを接着することにより、弾性軸剛性及び最大圧縮耐力を増大できること、山形鋼ブ

レースが座屈により塑性化してもある部分に塑性化が集中して進行することなく、完全除荷時に生じる残留中央たわみ、残留軸縮みは非常に小さいこと、高強度型炭素繊維プレートを山形鋼外面に2層接着する形式が最も変形性能が優れること、等を明らかにした。

また、文献5では、鉄塔に用いられる山形鋼主材の補強への適用を考え、対象とする強風等の外乱は圧縮・引張を交互に与える繰返し荷重であることを考慮して、正負交番の繰返し荷重下に対しての補強効果を明らかにするため、補強した模型山形鋼ブレース材試験体の正負交番漸増繰返し載荷実験を行った。その結果、炭素繊維プレートを接着していない断面で、最大引張軸力は決定されること、引張力には、炭素繊維プレートを接着していない部分が塑性化するので大きな引張軸変形が生じて、接着面下の鋼材の

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 東レ建設(株) 技術設計部

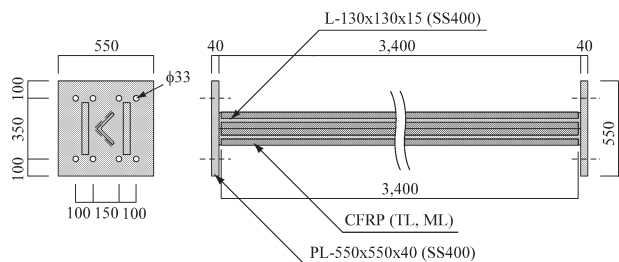


図1 試験体の形状

表1 試験体名称

試験体名称	CFRPの種類	接着層の厚さ (mm)		備考
		第1層	第2層	
N	-	-	-	無補強
NML2-1	NML	1.10	1.20	中弾性型CFRP
NML2-2	NML	1.10	1.15	中弾性型CFRP
UTL2	TL	1.20	1.20	高強度型CFRP
UTLUML	TL, ML	1.10	1.20	高強度、中弾性型CFRP

表2 CFRPの中心線平均粗さ (板幅方向)

CFRPの種類	対象とする面	Ra (μm)
TL	初期製造目粗し面	5.66
	目粗しなし面	0.60
	#180サンドペーパー面	0.90
ML	初期製造目粗し面	6.99
	目粗しなし面	0.29
NML	目粗しなし面	0.72
	#180サンドペーパー面	1.62

表3 素材試験結果

	ヤング係数	降伏応力	引張強度	破断ひずみ
	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
CFRP TL	169.1	-	3,085	1.52
CFRP ML	295.7	-	2,169	0.71
鋼材 (SS400)	205	286	382	28.4

ひずみは弾性範囲内に留まり、炭素繊維プレートを全面に接着しておけば、剥離は生じず圧縮側の補強には悪影響しないこと等を明らかにした。

さて、大スパンの鉄骨トラス架構や送電鉄塔では、耐荷力は、材の座屈強度により決定される。この構造物を一般工法によって、補修・補強するためには、規模の大きい足場等の仮設構造物を要するという難点がある。本炭素繊維プレートによる接着圧縮補強工法は、幅50mm厚さ2mmの非常に軽い板材を火気を利用せず接着するのみの工法なので、大きな足場も不要である。したがって、十分な圧縮補強が実大試験体で証明されれば、鉄骨トラス架構や送電鉄塔の効果的な補強方法として利用されると考えられる。

そこで本研究では、これまでの模型試験体の実験結果から得られた良好な接着形式を採用し、実大規模の山形鋼ブレース材を補強した試験体を製作し、偏心座屈試験を行って、本補強工法の実用性を検証する。

2. 試験概要

本節では、炭素繊維プレートによる補強実大山形鋼ブレース材の偏心単調圧縮試験の概要を示す。

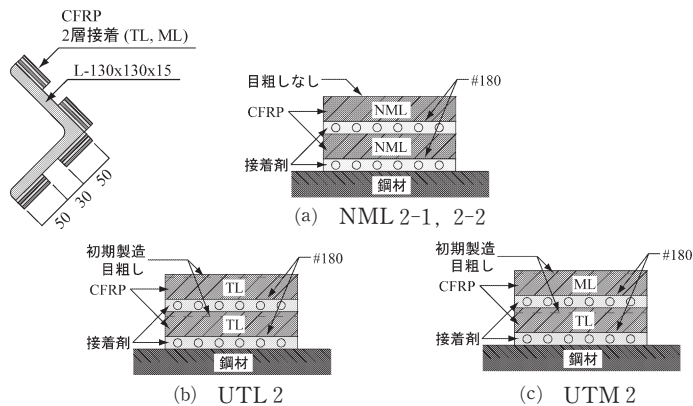


図2 各試験体のCFRP 2層接着状況

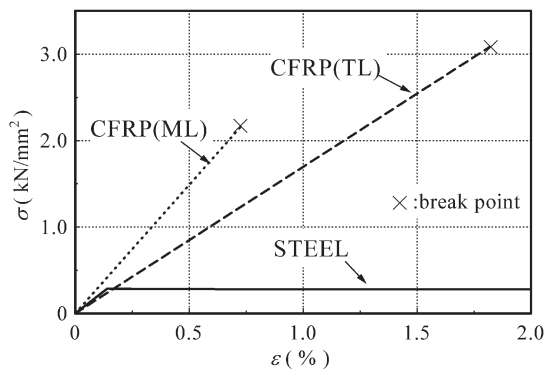


図3 炭素繊維プレートの応力-ひずみ関係

2.1 試験体

試験体の形状を図1に、試験体名称を表1に示す。

試験体は、全長3,400の山形鋼(L-130x130x15, SS400)の両端に板厚40mmの鋼板(PL-550x550x40)をその中心を山形鋼の図心に一致させて溶接し、山形鋼外面を覆うように幅50mm厚さ2mmの炭素繊維プレートを2層としたもの4列、計8枚(鋼材との接着長さ3,360mm)を接着したものである。

用いる炭素繊維プレートは、高強度型炭素繊維プレート(TL)と中弾性型炭素繊維プレート(ML, NML)の2種類であり、TL及びMLと表記したものは一面に初期製造目粗しを行ったもので、NMLは、この初期製造目粗し面を持っていないものである。TL及びNMLの炭素繊維プレートの中心線平均粗さ $R_a(\mu\text{m})$ を表2に示す。

用意した試験体は、これら炭素繊維プレートや接着面の組み合わせを変えたものである。この各試験体の接着状況を図2に示す。

試験体は、中弾性型炭素繊維プレート(NML)を第1・第2層とも使い、接着面は、#180のサンドペーパーで目粗しして接着したものを2体(NML 2-1, NML 2-2試験体)、高強度型炭素繊維プレート(TL)を第1・第2層とも使い、初期製造目粗し面を外側に向け、もう一方の内側の面は#180サンドペーパーで目粗しして接着したもの(UTL 2試験体)、第1層(内側)に高強度型炭素繊維プレート(TL)

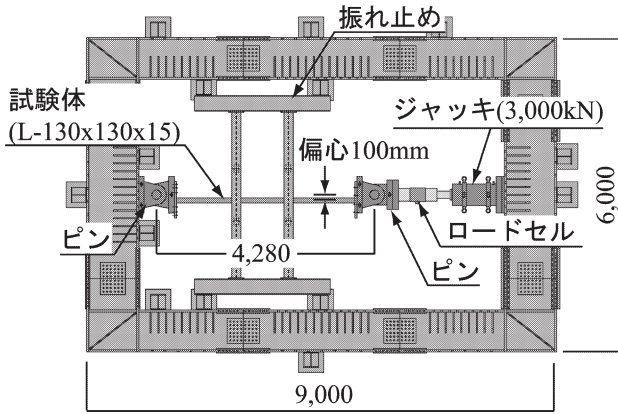


図4 加力装置の概要

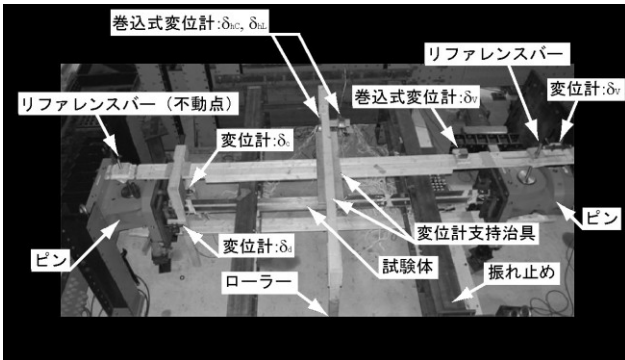


写真1 変位計測治具の概要

表4 接着剤の力学的特性

ヤング係数	曲げ強度	圧縮降伏強度	引張強度	引張せん断付着強度	衝撃強度
kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kJ/m ²
2.28	55.8	59.0	34.8	25.5	4.2
JIS K7208	JIS K7203	JIS K7208	JIS K7113	JIS K6850	JIS K7111

表5 山形鋼ブレース材の断面性能

断面積	断面2次モーメント	有効座屈長さ	細長比	オイラー座屈荷重
mm ²	mm ⁴	mm	-	kN
3,675	2.34x10 ⁶	4,280	180	256

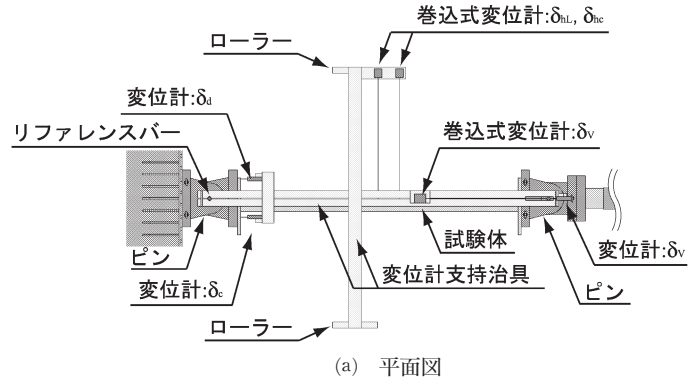
を第2層(外側)に中弾性型炭素繊維プレート(ML)を用い、各プレートの初期製造目粗し面を外側に向け、もう一方の内側の面は、#180サンドペーパーで目粗しして接着したもの(UTM2試験体)、及び、比較のため無補強の試験体(N試験体)の5本を用意した。炭素繊維プレート及び鋼材の素材試験結果を図3及び表3に示す。

尚、接着には、常温二液硬化型エポキシ樹脂接着剤(コニシボンドE258)を用い、常温20℃以上で7日間以上養生した。各試験体の接着の層厚を表1に示す。

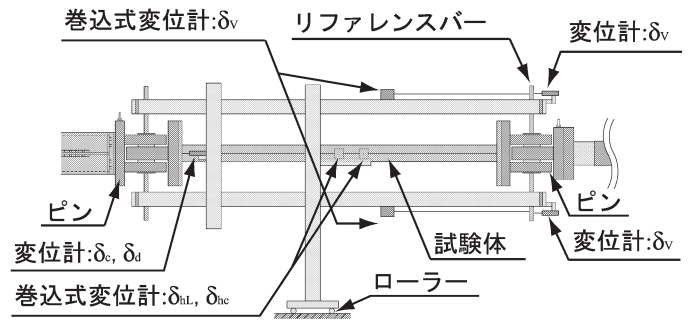
2.2 載荷方法と計測方法

○加力装置

加力装置の概要を図4、写真1に示す。外形寸法で9,000mm x 6,000mmの□型反力フレーム(BH-1,000x450x26x40,



(a) 平面図



(b) 立面図

図5 変位計測治具の詳細

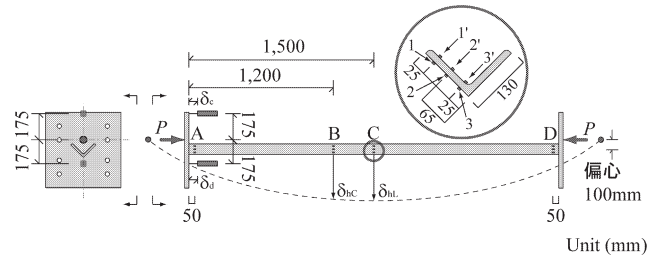


図6 計測諸量の模式図とひずみ測定位置

BH-800x450x26x40, SS490)に、ストローク500mm、載荷能力3,000kNの複胴式油圧ジャッキが設置されている。

試験体の両端には、山形鋼ブレースの弱軸方向に回転するピンがブレース図心から弱軸方向にピン中心を100mm偏心させて取り付けられている。

ピンの一方は反力フレームに、ピンの他端はロードセルを介して、ジャッキにボルト接合している。ピン間の有効座屈長さは4,280mmである。

試験体が強軸方向に変形しないよう、材長の1/3の箇所2点を、H形鋼でテフロンシートを用いて挟み込んだ振れ止めを取り付けている。

○加力プログラム

加力プログラムは、単調圧縮載荷とし、炭素繊維プレートに破断が生じるまで載荷する。座屈現象を追跡するため、加力の制御はストローク変位制御とした。

○計測方法

変位計測治具の詳細を図5に、計測諸量の模式図とひずみ測定位置を図6に、それぞれ示す。

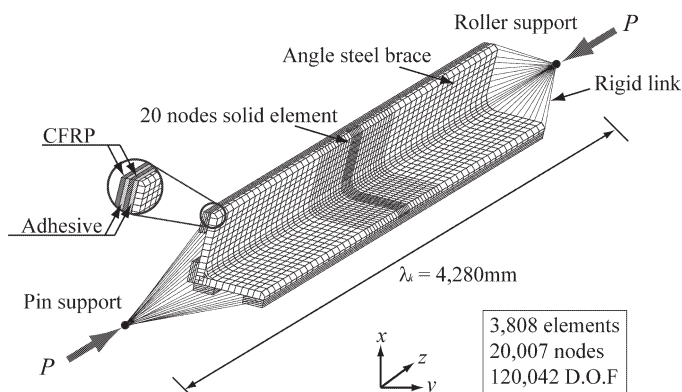


図7 有限要素法解析モデル

表6 解析用材料定数

	ヤング係数 kN/mm ²	ポアソン比	降伏応力 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
鋼材	205	0.28	286	382
ML	295.7	0.30	-	2,169
TL	169.1	0.34	-	3,085
接着剤	2.28	0.39	35	44

計測は、荷重については、ジャッキ先端に取り付けられたロードセルから、材軸方向荷重： P を、変位については、図5に示す変位計支持治具を用いて、試験体表裏の変位計からの平均値として材軸方向ピン間相対変位： δ_v を、加力心から弱軸方向に175mm離れた2点に設置した変位計からエンドプレートにおける材軸方向変位： δ_c, δ_d を、ブレース材中央点及び中央から500mm離れた位置(B位置)に付けた巻込式変位計により横たわみ： δ_{hc}, δ_{hl} を計測した。ひずみについては、材中央(C位置)、左右材端部(A,D位置)及び中央から500mm離れた位置(B位置)の断面について、山形鋼断面の表裏計6ヶ所(図6参照)の材軸方向ひずみを検長5mmの箔ひずみゲージにより計測した。ゲージ番号1及び3の位置のものは無補強試験体を除き、炭素繊維のひずみであり、それ以外(ゲージ番号2, 1'~3')は鋼材のひずみである。

変位の計測値からエンドプレートの回転角： θ を次式で求めた。

$$\theta = \frac{\delta_c - \delta_d}{l_a} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 l_a は θ_c と θ_d との計測点間距離(=350mm)である。

尚、表5には、山形鋼ブレースの断面性能と、実験結果の整理のためのオイラー座屈荷重値： P_{cr} を示す。

3. 有限要素法解析の概要

本工法の補強効果を吟味するため、実験を行った補強山形鋼ブレース材について複合非線形有限要素法解析を行った。

本節では、解析方法について述べる。

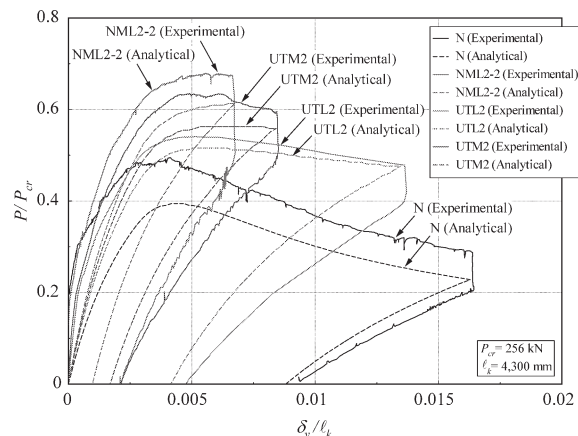


図8 軸力-軸縮み関係

有限要素解析の解析モデルを図7に示す。山形鋼、炭素繊維プレート及び接着剤は完全に接合しているものとし、20節点立体要素で要素分割した。ピン位置に節点を2つ設け、山形鋼エンドプレート上の各節点を剛リンク要素で接合し、一端をピン支持、一端を材軸方向をローラー支持して、強制変位を与えて軸力を作用させ、実験と同じ軸縮みを生じさせた後、軸力を0にまで除荷し、残留変形形状も調べる。解析領域は全領域とした。

炭素繊維プレートや接着剤は、文献6,7で紹介されているように直交異方向材料であり、弾性応力-ひずみ関係式や破壊・塑性条件は特別な取り扱いをするべきであるが、ここでは簡単化のため、鋼材と同様すべて等方弾性体とし、降伏条件・破壊条件はVon-Misesの条件を採用する。用いる材料定数を表6に示す。

解析は、N試験体、NML2-2試験体、UTL2試験体、UTM2試験体の計4ケースについて行った。

要素分割数は3,808、節点数は20,007、全自由度数は120,042で、N試験体で応力集中が生じる箇所を密に分割した。また、20節点立体要素を利用するので、板厚方向の分割を2としている。

解析プログラムには、広島工業大学情報メディアセンター所有の汎用非線形構造解析ソルバー「MSC. Marc ver 2005」を用いた。

4. 実験・解析結果とその考察

図8には、無補強試験体のオイラー座屈荷重で無次元化した軸力(P/P_{cr})と、有効座屈長さで無次元化した軸縮み(δ_v/l_k)の関係を各試験体について示す。図9には、(P/P_{cr})と有効長さで無次元化した中央横たわみ(δ_{hc}/l_k)と、中央から500mm離れた点の横たわみ(δ_{hl}/l_k)との関係を、N, NML2-2, UTL2, UTM各試験体ごとに分けて示す。図8,9には、有限要素法解析結果を併せて示している。

表7には、実験で得られた最大圧縮軸力、最大中央変位、中央から500mmの最大横たわみ、残留軸縮み、破断時の

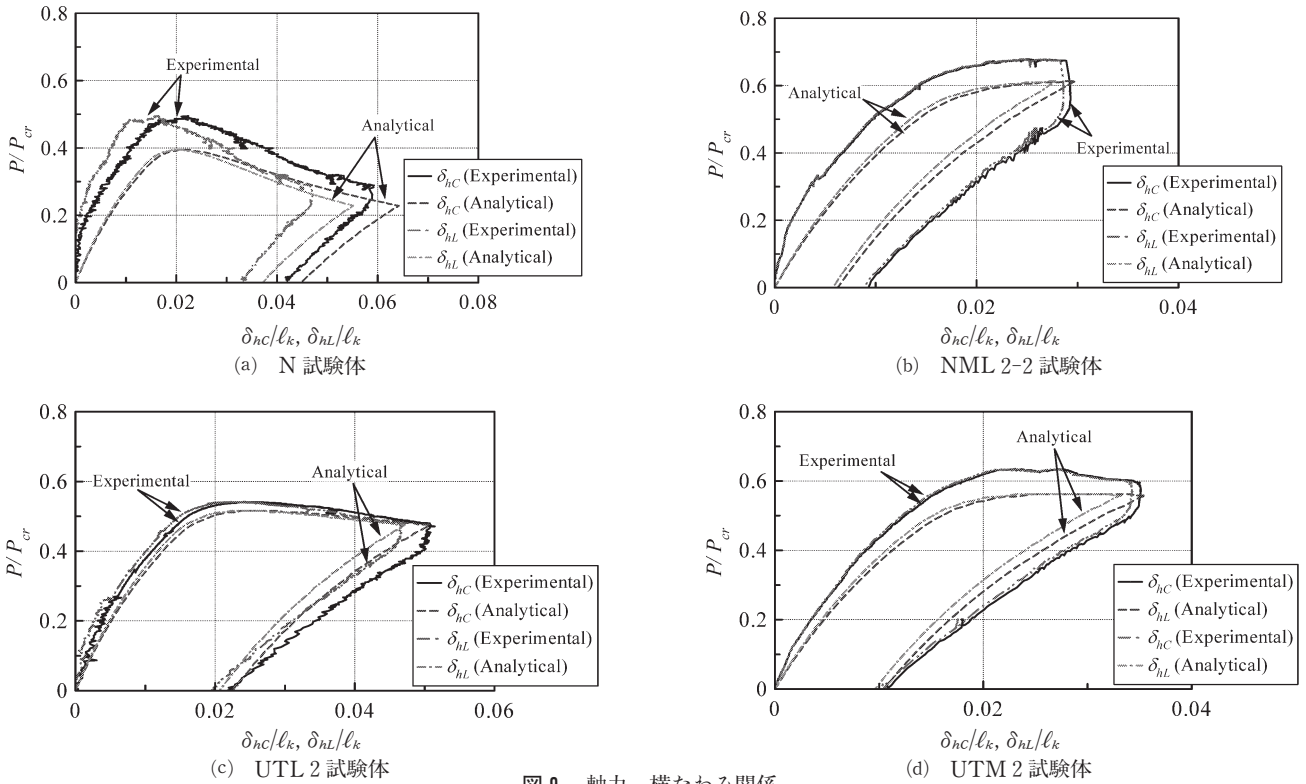


図9 軸力-横たわみ関係

CFRP 最大ひずみ、及び破断状況を示す。

図10にはN, NML 2-2, UTL 2, UTM 2試験体について、B位置及びC位置のひずみと (P/P_{cr}) との関係を示す。

写真2には、N, NML 2及びUTL 2試験体の試験終了後の状況を示す。

以下に各項目毎に分けて考察を示す。

○最大圧縮耐力

図8, 表7より、中弾性型炭素繊維を接着するもの(NML 2, UTM 2試験体)は、最大圧縮耐力を向上させるのに効果的であり、無補強試験体と比べNML 2試験体で約1.40倍、UTM試験体で約1.30倍最大圧縮耐力を向上させることができる。これは、中弾性型炭素繊維プレートの補強効果が高强度炭素繊維プレートのそれに比べて高いのは、炭素繊維プレートの繊維方向のヤング係数が鋼材と比べて1.40倍と高いためである。

有効要素解析値の軸力-軸縮み関係は、実験値のそれと比べ25~20%程度軸力が小さいものの、炭素繊維プレート補強による耐力上昇の程度を良好に予測している。解析値が実験値より低めとなるのは、実験で用いたピンは摩擦力により抵抗曲げモーメントが増大するためと考えられる。

○残留変形状

図9, 写真2より、無補強試験体(N試験体)では、中央部の横たわみ： δ_{hc} と中央部から500mmの位置の横たわみ： δ_{hL} との差が大きく、除荷後の残留横たわみが大きい。一方、炭素繊維プレートで補強した試験体の δ_{hc} と δ_{hL} の差は、比較的小さく、除荷時の残留横たわみは小さい。有

限要素法の解析値からも同様の傾向が示唆されている。

図10より、N試験体では最大耐力後、耐力低下に伴って、C位置のひずみが集中して生じる一方、NML 2, UTL 2, UTM 2試験体では、B位置、C位置とも同等のひずみが生じていることがわかる。

以上のことから、炭素繊維プレートを接着する補強により座屈に起因して生じる塑性ひずみ集中を緩和でき、残留横たわみも軽減しうることがわかる。

有限要素解析値は、塑性変形の局所化による δ_{hc} , δ_{hL} の挙動変化や、残留変位等を良好に再現している。

○破壊性状と接着特性

図10, 写真2, 表7より、補強試験体ではすべて、破壊は接着界面ではなく炭素繊維プレートの中央の軸方向に破断した。破断時の炭素繊維プレートのひずみは、NML 2試験体で $2,000 \mu$ 、UTL 2試験体で $4,000 \mu$ 、UTM 2試験体で $2,600 \mu$ であり、直下の鋼材は塑性化が生じているにも関わらず、接着剤で破壊が生じていない。このことから、採用した接着剤は十分な接着性能を有することがわかる。

文献5, 6では、中弾性型炭素繊維プレートはせん断強度が低く、早期にプレート層内で破壊が生じることを指摘した。中弾性炭素繊維プレートは、弾性剛性は高いが、初期製造目粗し工程で繊維が傷み、せん断強度が低下すると考えられる。このため、中弾性型炭素繊維プレートの初期製造目粗し面を上面とする接着をしたNML 2, UTM 2試験体は、文献5, 6にみられたプレート層内破壊を生じることなく、大きな横たわみ変形に追従したと考えられる。

表7 試験結果

試験体名称	最大圧縮耐力	最大中央点 横たわみ	中央から500mm の最大横たわみ	残留軸縮み	破壊時のCFRP 最大ひずみ	破壊状況
	kN	mm	mm	mm	μ	
NML2-1	174 (1.37)	126.0 (0.49)	123.0 (0.61)	9.2 (0.23)	2,284	CFRP中央部材直交方向破断
NML2-2	172 (1.36)	135.2 (0.53)	113.8 (0.56)	8.0 (0.20)	2,264	CFRP中央部材直交方向破断
UTM2	162 (1.28)	151.0 (0.59)	147.4 (0.72)	9.1 (0.23)	2,503	CFRP中央部材直交方向破断
UTL2	139 (1.09)	221.2 (0.87)	201.2 (0.99)	20.2 (0.50)	3,888	CFRP中央部材直交方向破断
N	127 (1.00)	254.8 (1.00)	202.6 (1.00)	40.4 (1.00)	-	中央部が局部変形

()内は、N試験体との比

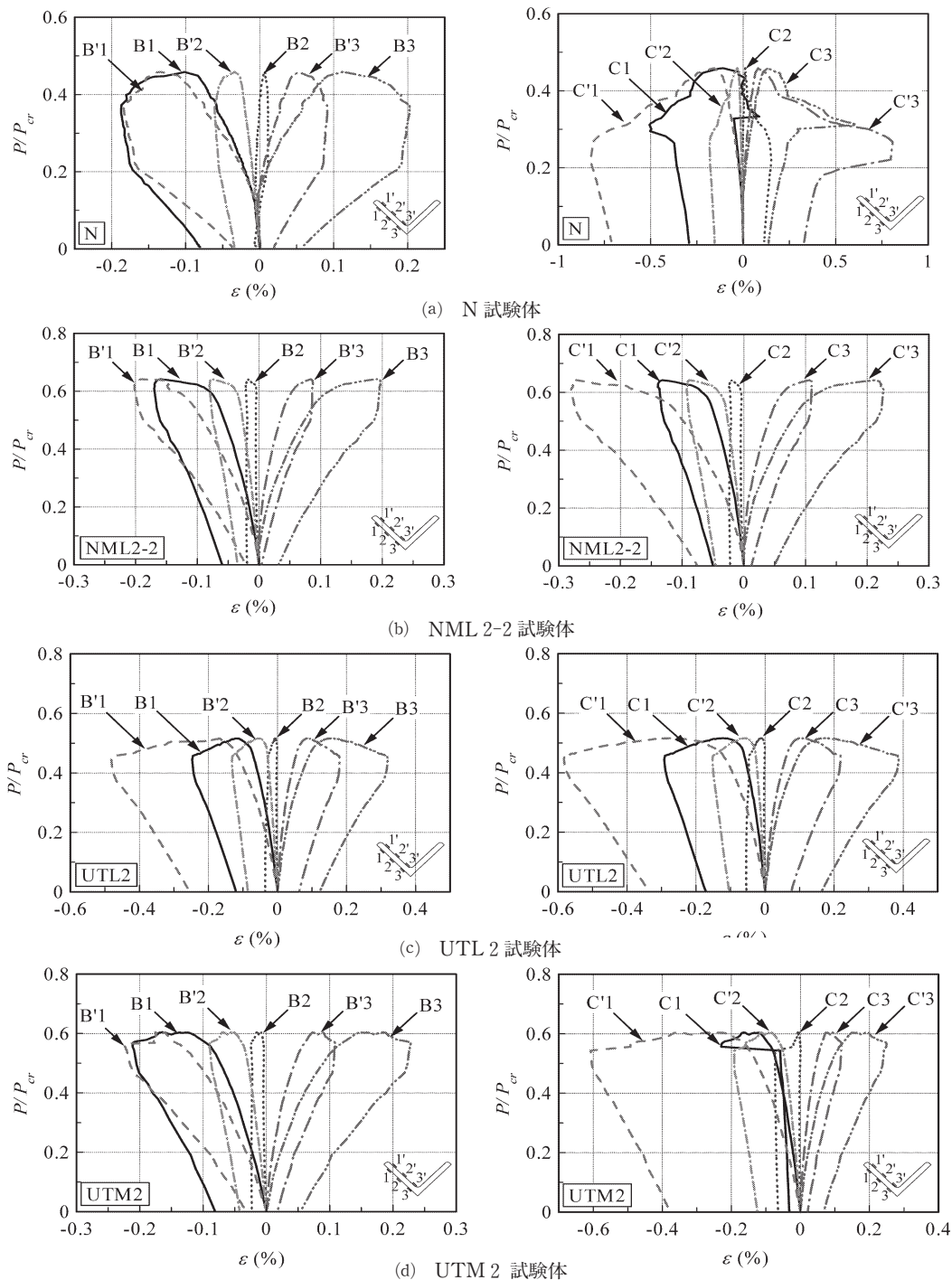
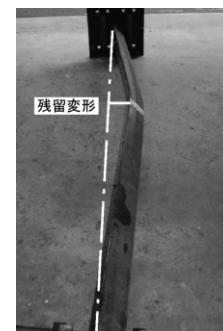
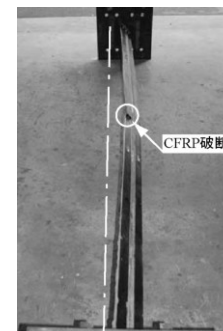


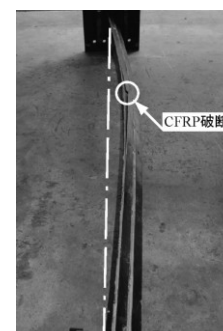
図10 軸力-ひずみ関係



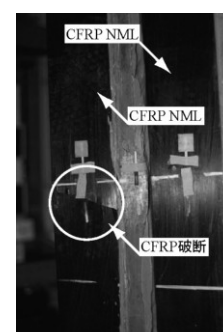
(a) N 試験体



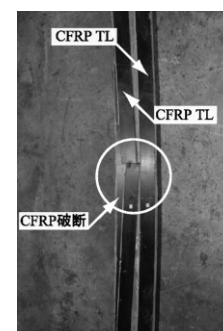
(b) NML2-1 試験体



(c) UTL2 試験体



(d) NML2-1 試験体(詳細)



(e) UTL2 試験体(詳細)

写真2 試験終了後の状況

補強試験体すべてが炭素繊維が幅方向に破断した事実は、すなわち、全強度まで新素材である炭素繊維プレートの優れた性能を利用できた補強が可能であることを示唆している。

5. まとめ

炭素繊維プレートによる山形鋼プレース材に対する圧縮補強の実用性を検証するため、実大試験体について単調圧縮偏心座屈試験を行うとともに、複合非線形有限要素解析を行って、補強効果を吟味した。

得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) ピン摩擦力の影響で、最大耐力の実験値は、解析値と較べて1~2割高くなる。
- 2) 解析値は、炭素繊維接着補強による耐力上昇の程度や塑性変形の局所化による δ_{hc} , δ_{hL} の挙動変化や、残留変形等を良好に再現している。
- 3) NML 2 及び UTM 2 の接着形式では、最大圧縮耐力は約 1.4, 1.3 倍増大できる。また、塑性率で 2 までは炭素繊維は変形に追従する。
- 4) 無補強試験体では、中央部の横たわみが大きく生じる座屈波形となり、残留横たわみも大きい一方、NML 2, UTM 2 の形式で炭素繊維を接着すれば、残留横たわみは大幅に軽減できる。
- 5) 中弾性型炭素繊維プレートの初期製造目粗し面を上面とする接着をすれば、炭素繊維プレートは大きな変形に追従し、接着界面で破壊することなく、炭素繊維プレート母材が幅方向に中央で破断する。
- 6) NML 2, UTM 2 の接着形式によれば、炭素繊維プレートの強度を十分に引き出す補強が、実大山形鋼プレースについても実施できる。

今後、炭素繊維プレートの異方性や破壊条件を精密にし、有限要素法解析により補強山形鋼プレース材の炭素繊維プレートの破断限界の推定を行う予定である。

謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者 高松隆夫教授)のプロジェクトの一環として実施されました。実験実施にあたり、2007年度広島工業大学工学部建築工学科玉井研究室、高松研究室の学生には、多大の協力を得た。ここに記し、謝意を表します。

文 献

- 1) El Damatty, A.A., Abushagur, M., Yousserf, M.A.: Experimental and analytical investigation of steel beams rehabilitated using GFRP sheets, steel and Composite Structures, Vol.13, No 6, pp.421-438, 2003.3.
- 2) 渡辺憲市, 板垣一也, 鈴木博之: 炭素繊維補強化樹脂版による鋼橋の補強, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, pp.679-682, 2000.11.
- 3) 玉井宏章, 高松隆夫, 原 伸幸, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる鋼構造物小ばりの曲げ補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.523-530, 2005.11.
- 4) 玉井宏章, 高松隆夫, 櫻庭 誠, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる山形鋼プレース材の圧縮補強について, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.553-560, 2005.11.
- 5) 櫻庭 誠, 玉井宏章, 高松隆夫, 灰谷徳治, 服部明生: 炭素繊維プレートによる補強山形鋼プレース材の正負交番繰返し載荷実験, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp.437-444, 2006.11.
- 6) 玉井宏章, 高松隆夫, 櫻庭 誠, 灰谷徳治, 服部明生: 連続繊維プレートと鋼材との接着特性に関する有限要素解析, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.537-544, 2005.11.
- 7) 座古 勝, 松本金矢: 複合材料の挙動解析, 朝倉出版, pp.33-46, 1998.3.